

TÍTULO: OPTIMIZACIÓN DEL ANÁLISIS BEST-ESTIMATE DE UN ELEMENTO COMBUSTIBLE BWR CON EL CÓDIGO STAR-CCM+

Autores / Empresa: Eugenia Morgado Cañada/ DIN, UPM

Alberto Concejal Bermejo / Iberdrola Ingeniería y Construcción

Gonzalo Jiménez Varas/ DIN, UPM

Amparo Soler Martínez / Ekergy Software S.L

Dirección: José Gutiérrez Abascal, 2 | 28006 Madrid

Teléfono / Fax: +34 91 336 3112 / +34 91 336 3002

Correo electrónico: e.morgado@alumnos.upm.es

I. Introducción

Uno de los cálculos más complicados y aún bajo desarrollo con un Código de Dinámica de Fluidos (CFD) es el comportamiento termohidráulico 3D en el núcleo de un reactor tipo BWR debido sobre todo a la complejidad del tratamiento de fluido bifásico con ebullición y a la necesidad de mayor validación de los códigos CFD en estas condiciones. Por ello, desde hace años se ha realizado un esfuerzo desde los organismos internacionales para dotar de datos experimentales de calidad a los códigos CFD.

El objetivo del proyecto es la evaluación del código STAR-CCM+, así como el establecimiento de guías y procedimientos estandarizados para la discretización del espacio de estudio y la selección de los modelos físicos adecuados para la simulación de combustible BWR. Para ello se han simulado varios de los experimentos BFBT [1] que proporcionan una base de datos para el desarrollo de experimentos de medida de distribución de fracciones de huecos ante cambios de potencia con el fin de encontrar los modelos más adecuados para la simulación del problema.

En el segundo apartado de este artículo se describen brevemente los test BFBT. En el tercero se describe la implementación de las simulaciones donde se incluyen las geometrías y discretizaciones geométricas empleadas, así como los modelos físicos disponibles en el código que han proporcionado buenos resultados en la reproducción de los test BFBT seleccionados. En el cuarto apartado se exponen los resultados obtenidos y en el quinto las conclusiones.

II. Test BFBT y selección de experimentos

Los tests BFBT (BWR Full-Size Fine-Mesh Bundle Test), realizados conjuntamente por la NRC (Nuclear Regulatory Commission, EUU) en cooperación con la NEA/OECD (Nuclear Energy Agency/ Organization for Economic Cooperation and Development) y JNES (Japan Nuclear Energy Safety), basándose en los datos termohidráulicos desarrollados por NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation) proporcionan una base de datos experimental de distintos parámetros: caída de presión, potencia crítica y fracción de huecos empleando distintos tipos de elementos combustibles y condiciones iniciales y de contorno. Más información disponible en [1].

Dichas medidas se han realizado a distintas posiciones axiales (682, 1706, 2730 y 3758 mm). En las tres posiciones inferiores se han realizado mediante densitómetros de rayos X mientras que en la posición superior se ha empleado un escáner CT de rayos X que puede rotar en torno a la barra combustible.

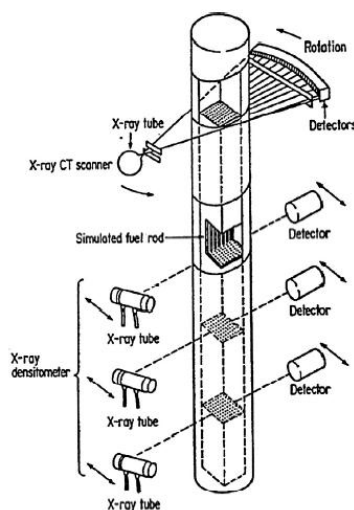


Fig. 1 Esquema de medición de los test BFBT. [1]

Los test BFBT se dividen en dos fases que contienen diversos ejercicios. En las simulaciones efectuadas se han seleccionado algunos de los test correspondientes a la Fase I-Ejercicio 1, en la cual se mide la fracción de huecos en estado estacionario en condiciones similares a las de operación normal de un reactor BWR. Concretamente se han seleccionado los test 0011-53, 0011-55, 0011-58 y 0011-61 (Tabla 1) para la configuración geométrica 0-1 que se muestra en la Figura 2 y medidas disponibles en la Tabla 2.

Tabla 1 Test BFBT seleccionados. [1]

Test	p (MPa)	Flujo másico (t/h)	Subenfriamiento a la entrada (KJ/Kg)	Calidad a la salida (%)
0011-53	7,159	55	50,2	2
0011-55	7,159	55	50,2	5
0011-58	7,159	55	50,2	12
0011-61	7,159	55	50,2	25

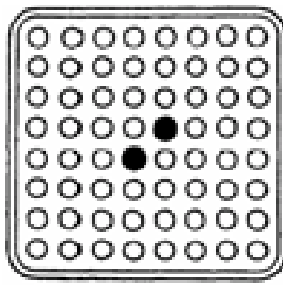


Fig. 2 Elemento combustible 0-1. [1]

Tabla 2 Medidas del elemento combustible 0-1. [1]

Items	Current 8 × 8
Number of fuel rods	62
Outer diameter (mm)	12.3
Heated length (m)	3.7
Number of water rods (mm)	2
Outer diameter of water rod (mm)	15.0
Rod pitch (mm)	16.2
Width of channel box	132.5
Number of spacers	7
Spacer type	Grid

Los test seleccionados representan casos en diferentes regímenes de flujo estimables a partir de la fracción de huecos a la salida del elemento combustible que puede calcularse mediante la expresión (1) disponible en la referencia [2].

$$\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_V}{\rho_L} S} \quad (1)$$

Donde α representa la fracción de huecos, x representa la calidad de vapor a la salida a la presión y temperatura de cada test definidas en [1][1], ρ_V y ρ_L representan las densidades del vapor y del líquido, respectivamente. S representa el ratio entre las velocidades del vapor y el líquido y toma el valor uno cuando se trata de un caso en el cual se considera el modelo de equilibrio homogéneo (HEM).

Tabla 3 Tabla equivalencias calidad a la salida, fracción de huecos y régimen de flujo.

Test	Calidad a la salida (%)	Fracción de huecos a la salida	Régimen de flujo esperado
0011-53	2	0,27	Bubbly
0011-55	5	0,5	Slug / Churn
0011-58	12	0,73	Slug / Churn
0011-61	25	0,87	Annular

III. Desarrollo de los modelos de la simulación

Se han ejecutado diversas simulaciones en estacionario en condiciones similares a las nominales de un reactor BWR. Para ello se han creado diferentes modelos con distinto

detalle geométrico del elemento combustible con rejillas cuya simulación plantea grandes retos en la simulación. Tras la dificultad de completar las simulaciones para la geometría del combustible 8x8 con rejillas, se decidió que éstas se ejecutarían para un subcanal interno. A continuación se estudió el ajuste de los modelos que permiten la descripción de los fenómenos físicos de transmisión de calor y turbulencia en regímenes bifásicos ante distintas potencias con el fin de optimizar los parámetros de simulación para reproducir los regímenes de flujo correspondientes a la formación de vapor en cada test seleccionado.

En primer lugar se ha creado la geometría del elemento combustible 8x8 con rejillas descrito en los test BFBT y se ha conseguido generar una malla tetraédrica con 99.718.736 celdas (Figura 3) que satisface los criterios de calidad, sin embargo el elevado número de celdas que contiene supone tiempos de ejecución muy elevados.

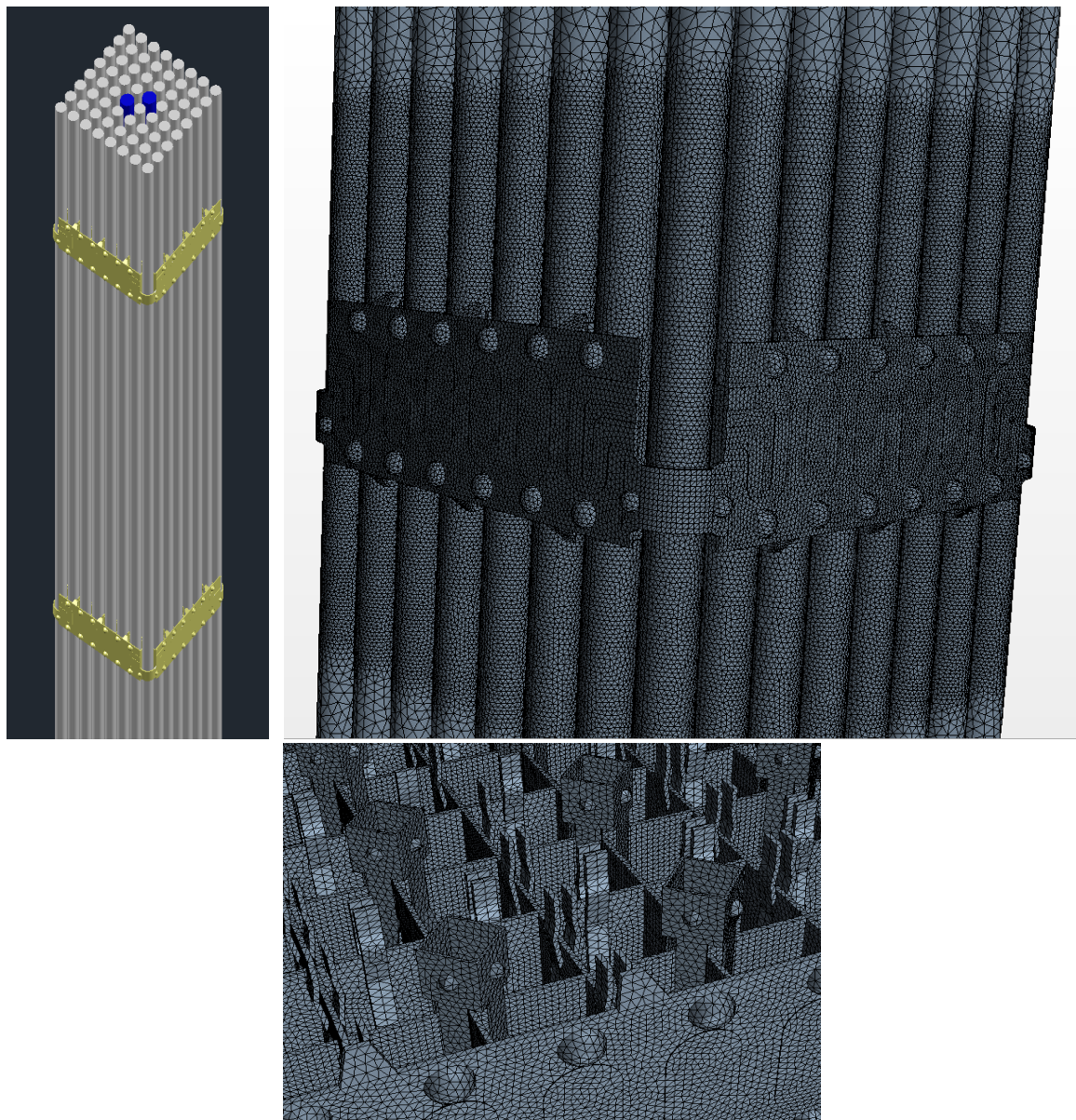


Fig. 3 Geometría y mallado tetraédrico del elemento combustible completo

En una primera evaluación del código STAR-CCM+ no resulta viable emplear una malla tan pesada. Por lo tanto se decide reproducir las simulaciones en una geometría más sencilla, un subcanal interno representativo del elemento descrito en los test BFBT. En este caso se ha generado una malla hexaédrica (617.793 celdas) que evita los problemas de difusión numérica en la solución observados en mallas poliédricas.

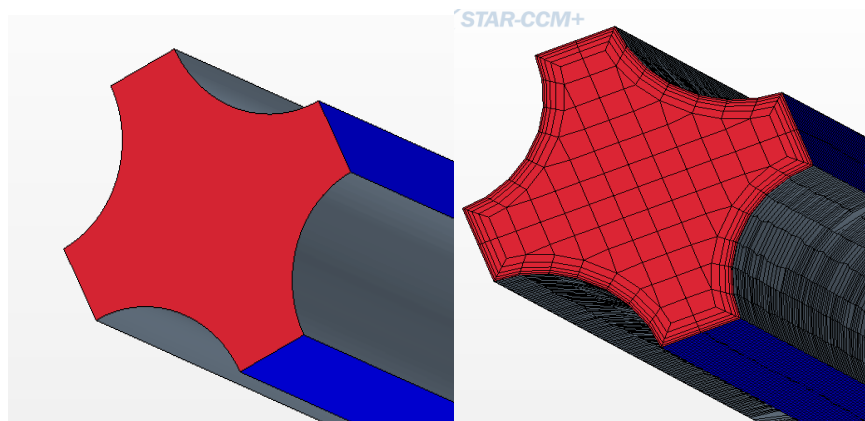


Fig. 4 Geometría y mallado hexaédrico del subcanal interno

Tras la obtención de una malla que satisfaga los criterios de validez se procede con la implementación física que describe la fenomenología presente en combustibles BWR, en consecuencia han sido seleccionados los modelos de turbulencia, energía, ebullición e interacción entre fases.

El cálculo de turbulencia en la fase líquida se realiza con el modelo K-Epsilon Estándar con tratamiento *High y+* en la pared, además se imponen los valores que toma la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación turbulenta (ϵ) en la entrada del canal. Mientras que el cálculo turbulento en la fase vapor se ha suprimido puesto que analíticamente no mejora sustancialmente la solución y sólo contribuye a ralentizar la computación y a inestabilizar la convergencia.

Además se ha impuesto el valor negativo al coeficiente de elevación (*lift*) que imprimirá a las burbujas tendencia a acumularse en el interior del subcanal. También se han seleccionado los modelos de arrastre (*drag*) de burbujas en función del régimen de flujo simulado por cada uno de los test según se observa en la Tabla 4.

Tabla 4 Selección de modelos para el cálculo de arrastre de burbujas

Test	0011-53	0011-55	0011-58	0011-61
Régimen de flujo esperado	Bubbly	Slug / Churn	Slug / Churn	Annular
Corrección de arrastre	Simmonet	Volume Fraction Exponent	Volume Fraction Exponent	Volume Fraction Exponent
Coeficiente de arrastre	Schiller-Naumann	Schiller-Naumann	Schiller-Naumann	Schiller-Naumann

A continuación se procede a ejecutar las simulaciones con la geometría y malla de la Figura 4 y los modelos físicos disponibles en STAR-CCM+ y las correcciones descritas para cada uno de los test que se van a reproducir.

IV. Resultados

Se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones en estacionario tras alcanzar la convergencia en 25.000 iteraciones. Los tiempos de ejecución (con un procesador i7-4700MQ, 2,40GHz, 4 núcleos y una memoria instalada de 24 GB) de las simulaciones son de 144 horas-CPU para los test 0011-53 y 0011-55 mientras que los otros dos test, 0011-58 y 0011-61, han consumido tiempos ligeramente superiores alcanzando 192 horas-CPU.

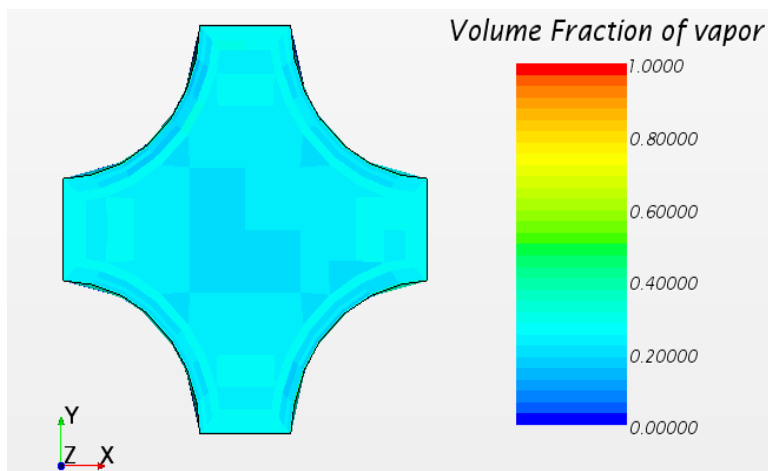


Fig. 5 Fracción de huecos a la salida del subcanal, test 0011-53

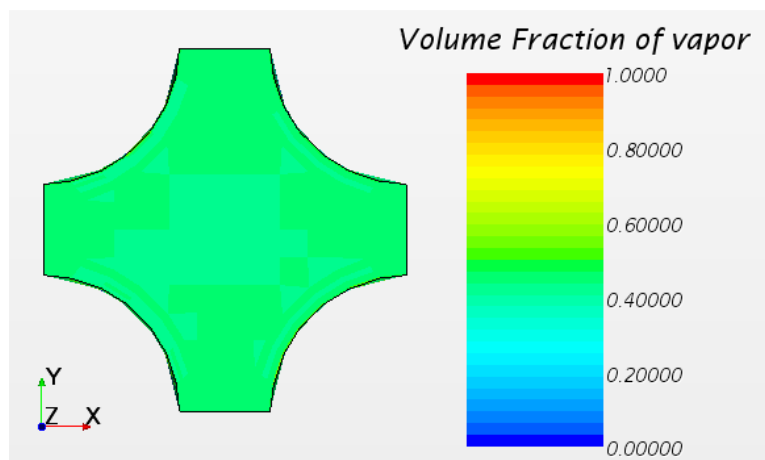


Fig. 6 Fracción de huecos a la salida del subcanal, test 0011-55

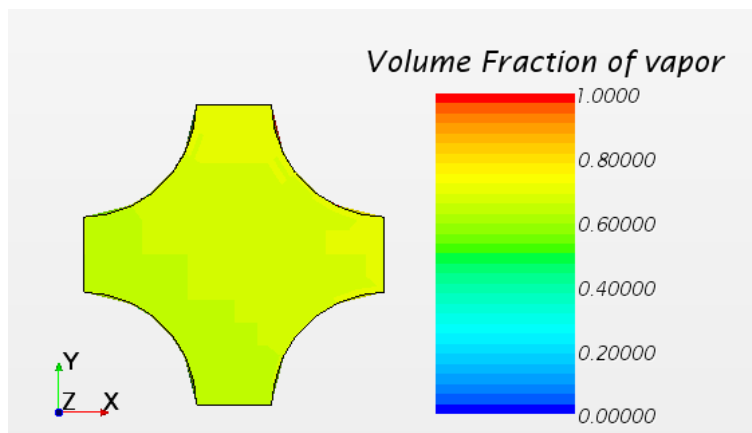


Fig. 7 Fracción de huecos a la salida del subcanal, test 0011-58

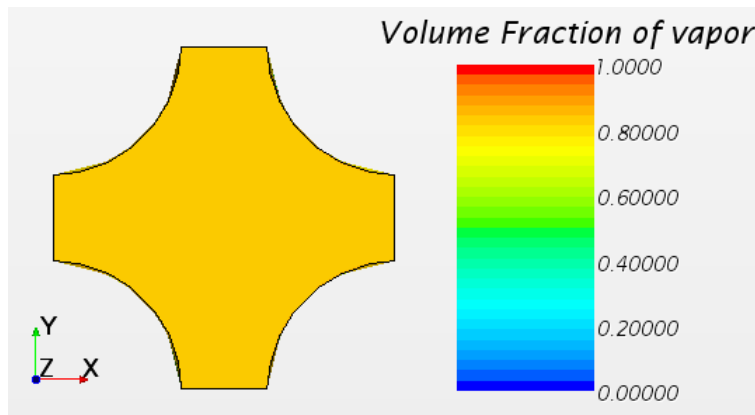


Fig. 8 Fracción de huecos a la salida del subcanal, test 0011-61

Tabla 5 Resultados obtenidos en las simulaciones

Test	$X_{\text{experimental}}$	X_{medido}	$\%Error_x$	$\alpha_{\text{experimental}}$	α_{medido}	$\%Error\alpha$
0011-53	2 %	1,50 %	-25,00 %	0,286	0,238	-16,85 %
0011-55	5 %	3,90 %	-22,00 %	0,500	0,444	-11,14 %
0011-58	12 %	9,36 %	-21,95 %	0,730	0,67	-8,22 %
0011-61	25 %	20,49 %	-18,04 %	0,866	0,834	-3,69 %
Error medio			-24,75 %			-9,98 %

Se observa que en todas las simulaciones se han producido subestimaciones. El mínimo error cometido en las simulaciones corresponde al caso de mayor potencia (régimen annular) con una subestimación del 3,7%. El test que peor se ha conseguido reproducir es el de menor potencia (régimen bubbly), con un error relativo ligeramente inferior al 17%.

La explicación más razonable es que el régimen bubbly necesita un ajuste más fino de los parámetros de los modelos de arrastre, elevación, etc. para conseguir reproducir los experimentos y además son necesarias más ejecuciones.

V. Conclusiones

Como conclusión al proyecto, ha sido posible evaluar las capacidades de STAR-CCM+ para reproducir la fenomenología presente en elementos combustibles BWR. Se ha conseguido alcanzar un equilibrio entre la consecución de resultados ajustados a los datos experimentales y el peso computacional de las simulaciones, que como cabía esperar es elevado pero razonable.

Se ha conseguido reproducir con buena aproximación, aunque con una ligera subestimación, los experimentos seleccionados bajo un rango amplio de potencia y correspondiendo cada uno a un régimen de flujo diferente.

VI. Referencias

- [1] *“NUPEC BWR Full-size Fine-mesh Bundle Test (BFBT) Benchmark - Volume I: Specifications”*. B. Neykov, F. Aydogan, L. Hochreiter, K. Ivanov The Pennsylvania State University - H. Utsuno, F. Kasahara Japan Nuclear Energy Safety Organization - E.Sartori OECD Nuclear Energy Agency - M. Martin Commissariat à l’Énergie Atomique

- [2] *“Nuclear System I”*. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi